

УДК 532.546

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭНЕРГИИ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОРИСТУЮ СРЕДУ, ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЕННУЮ ГАЗОГИДРАТОМ

Муллабаева Р.З.,

научный руководитель канд. физ.-мат. наук Дмитриев В.Л.

Стерлитамакская государственная педагогическая академия им. Зайнаб Бишиевой

Предположим, что на границе области пористой среды, заполненной в исходном состоянии частично газом, а частично газогидратом, действует излучатель энергии мощностью q . При таком воздействии в пористой среде образуются две зоны. В первой, находящейся вблизи источника излучения, в поровых каналах содержатся лишь продукты разложения газогидрата (газ и вода), а твердый газогидрат отсутствует. Во второй, дальней зоне, в пористых каналах присутствуют газогидрат и газ. Считаем, что поглощение излучения происходит в тонком слое на фронтальной границе между двумя зонами, где имеет место полное разложение газогидрата [4, 5].

Пусть объемная доля газогидрата в поровых каналах второй зоны составляет n . При математическом описании процессов фильтрации и теплопереноса введены следующие допущения: скелет, газогидрат, вода несжимаемы; газ – калорически совершенный, газовая фаза является подвижной, вода – неподвижной (u_{liq}); пористость m постоянна. Гидрат является двухкомпонентной системой с массовой концентрацией газа g . Нижние индексы s, h, liq, g будем относить соответственно к скелету, газовому гидрату, воде и газу. Параметры, соответствующие первой и второй зонам, снабжены нижними индексами $i = 1, 2$, заключенными в скобки.

С учетом принятых допущений запишем для одномерных задач уравнения сохранения массы, притока тепла, состояния газа, и закон Дарси [1, 5]:

$$m_{(i)} \frac{\partial r_{g(i)}}{\partial t} + r_{g(i)}^n \frac{\partial}{\partial r} (r^n r_{g(i)} m_{(i)} u_{g(i)}) = 0, \quad u_{g(i)} = m_{(i)} u_{g(i)} = - \frac{k_{(i)}}{m_{g(i)}} \frac{\partial p_{(i)}}{\partial r},$$

$$r_{(i)} c_{(i)} \frac{\partial T_{(i)}}{\partial t} + r_{g(i)} c_{g(i)} m_{(i)} u_{g(i)} \frac{\partial T_{(i)}}{\partial r} = r_{g(i)}^n \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial T_{(i)}}{\partial r} \right) + m_{(i)} \frac{\partial p_{(i)}}{\partial t} + u_{g(i)} \frac{\partial p_{(i)}}{\partial r} \quad (1)$$

$$p_{(i)} = r_{g(i)} R_g T_{(i)}, \quad m_{(1)} = m S_{g(1)}, \quad m_{(2)} = m(1 - n), \quad S_{g(i)} + S_{liq(i)} = 1.$$

Здесь $k_{(i)}$ – коэффициент абсолютной проницаемости, $m_{g(i)}$ – динамическая вязкость газа, $u_{g(i)}$ – истинная скорость газа, $u_{g(i)}$ – скорость фильтрации газа, $c_{g(i)}$ – теплоемкость газа при постоянном давлении, $l_{(i)}$ – коэффициент теплопроводности, $S_{g(i)}$ и $S_{liq(i)}$ – газонасыщенность и водонасыщенность; $n = 0$ соответствует плоскоодномерной задаче, а $n = 1$ – радиальносимметричной.

Из условий баланса массы для воды и газа, а также тепла на границе между зонами $r = r_{(s)}$ следует:

$$m n r_h (1 - g) \dot{r}_{(s)} = m S_{liq(1)} r_{liq} \dot{r}_{(s)},$$

$$m_{(1)} (1 - n) r_{g(s)} (u_{g(2)} - \dot{r}_{(s)}) - n r_h g \dot{r}_{(s)} = m S_{g(1)} r_{g(s)} (u_{g(1)} - \dot{r}_{(s)}), \quad (2)$$

$$l_{(2)} \frac{\partial T_{(2)}}{\partial r} - l_{(1)} \frac{\partial T_{(1)}}{\partial r} = m n r_h l \dot{r}_{(s)} - q.$$

На границе между зонами выполнены условия непрерывности давления, температуры и, следовательно, плотности газа:

$$p_{(1)} = p_{(2)} = p_{(s)}, \quad T_{(1)} = T_{(2)} = T_{(s)}, \quad r_{g(1)} = r_{g(2)} = r_{g(s)}, \quad (r = r_{(s)}). \quad (3)$$

На основе первого и второго уравнений из (2), с учетом закона Дарси из (1), получим:

$$-\frac{k_{(2)}}{m_{g(2)}} \frac{\partial p_{(2)}}{\partial r} + \frac{k_{(1)}}{m_{g(1)}} \frac{\partial p_{(1)}}{\partial r} = mn \frac{\partial r_h}{\partial r} \frac{g}{g_{(s)}} + \frac{r_h (1-g)}{r_l^0} - \frac{\partial T_{(s)}}{\partial r}, \quad (r = r_{(s)}). \quad (4)$$

Для значений температуры и давления на границе между зонами должно выполняться условие фазового равновесия:

$$T_{(s)} = T_0 + T_* \ln(p_{(s)}/p_{(s)0}), \quad (5)$$

где T_0 – исходная температура системы «пористая среда – газогидрат – газ», $p_{(s)0}$ – равновесное давление, соответствующее исходной температуре, T_* – эмпирический параметр, зависящий от вида газогидрата.

Источник излучения начинает функционировать в момент времени $t = 0$. При этом в случае плоскоодномерной задачи будем полагать, что интенсивность поглощения излучения постоянна ($q = \text{const}$), а для радиальной задачи примем $q = Q/2\pi r_{(s)}$, где q – интенсивность поглощения излучения, отнесенная на единицу площади поверхности фазовых переходов; Q – интенсивность излучения для линейного источника, отнесенная на единицу его длины.

Допустим, что в начальный момент времени в пористой среде, частично заполненной газогидратом, давление p_0 и температура T_0 однородны, причем $p_0 > p_{(s)0}$. Эти условия могут быть записаны в виде

$$p_{(2)} = p_0, \quad T_{(2)} = T_0, \quad t = 0, \quad r \in [0, r_{(s)}]. \quad (6)$$

Для плоскоодномерной задачи примем, что на границе пористой среды тепловой поток отсутствует, а давление газа со временем изменяется по некоторому закону:

$$l_{(1)} \frac{\partial T_{(1)}}{\partial r} = 0, \quad p_{(1)} = p_e^0(t), \quad r = 0, \quad t > 0. \quad (7)$$

В случае радиальной задачи условие отсутствия теплового потока на границе пористой среды имеет вид

$$2\pi r_e l_{(1)} \frac{\partial T_{(1)}}{\partial r} = 0, \quad t > 0, \quad r_e \in [0, r_{(s)}]. \quad (8)$$

Оценки показывают, что в большинстве случаев, представляющих практический интерес, в уравнении притока тепла можно пренебречь слагаемыми, связанными с конвективным переносом тепла и с баротермическим эффектом. Кроме того, в уравнении пьезопроводности, следующем из уравнения сохранения массы и закона Дарси, слагаемое, учитывающее переменность температуры, мало, если характерные перепады температуры ΔT в области фильтрации небольшие (например, при $\Delta T \ll T_0$). В дальнейшем будем также пренебрегать переменностью объемной теплоемкости и коэффициента теплопроводности всей системы «пористая среда – газогидрат – продукт разложения»: $r_{(1)}c_{(1)} = r_{(2)}c_{(2)} = rc$, $l_{(1)} = l_{(2)} = l$.

Тогда система (1) может быть приведена к виду

$$\frac{\partial p_{(i)}}{\partial t} = r^{-n} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^n A_{(i)}^{(p)} \frac{\partial p_{(i)}}{\partial r} \right), \quad \frac{\partial T_{(i)}}{\partial t} = A^{(T)} r^{-n} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^n \frac{\partial T_{(i)}}{\partial r} \right), \quad (9)$$

$$A_{(i)}^{(p)} = k_{(i)} p_{(i)} / m_{g(i)} m_{(i)}, \quad A^{(T)} = l / rc.$$

В случае плоскоодномерной задачи решение ищем в виде бегущей волны, когда граница фазовых переходов движется с постоянной скоростью $\dot{r}_{(s)} = u = const$.

Введем новую переменную $x = r - ut$. Тогда с учетом (3) и (6), для определения давления в первой и второй зонах запишем:

$$\begin{aligned} p_e \ln \frac{p_{(1)} - p_e}{p_{(s)} - p_e} &= - \frac{um_{g(1)}m(1-n)}{k_{(1)}}x, \quad (x < 0) \\ p_0 \ln \frac{p_{(2)} - p_0}{p_{(s)} - p_0} &= - \frac{um_{g(2)}m(1-n)}{k_{(2)}}x, \quad (x > 0). \end{aligned} \quad (10)$$

Исходя из условия (7), с учетом (3), температура в первой зоне будет постоянной и равной температуре на границе: $T_{(1)} = T_{(s)}$.

Для распределения температур во второй зоне решение второго уравнения из (9) будет иметь вид

$$T_{(2)} = T_0 + (T_{(s)} - T_0) \exp(-ux/A^{(T)}). \quad (11)$$

Давление $p_{(s)}$ определяется на основе (4) и (10), в предположении $p_e = p_{(s)}$ (а значит, $p_{(1)} = p_{(s)}$). Максимальное давление на границе фазовых переходов составляет $p_{(s)} \gg 84$ МПа и проявляется при гидратонасыщенности $n = 1$. Мощность источника излучения оказывает влияние лишь на скорость движения границы фазовых переходов и на профили давлений и температур во второй зоне.

Проведенные численные расчеты показывают, что давление во второй зоне при меньшей гидратонасыщенности пласта падает значительно быстрее. При этом падение температур и выход их на асимптоту – температуру пласта, происходит достаточно быстро. Анализ влияния исходного пластового давления p_0 на профили температур во второй зоне показывает, что при меньших пластовых давлениях достигается меньшая температура на границе разложения, и происходит более быстрое выравнивание температуры с исходной пластовой. Увеличение гидратонасыщенности пласта ведет к сближению профилей температур, построенных при разных исходных пластовых давлениях, и при гидратонасыщенностях около 0,9 они практически совпадают.

Увеличение мощности источника излучения приводит к росту скорости движения границы фазовых переходов, и, как следствие, к сужению зоны температурных перепадов вблизи ее.

Для решения радиальносимметричной задачи введем автомодельную переменную $x = r/\sqrt{A^{(T)}t}$. Применяя метод линеаризации Лейбенсона, для распределения давлений в первой и второй зонах с учетом (6) и (8) получим следующие выражения:

$$\begin{aligned} p_{(1)} &= p_{(s)}, \quad (0 < x < x_{(s)}) \\ p_{(2)}^2 &= p_{(s)}^2 + (p_0^2 - p_{(s)}^2) \frac{\int_0^x \frac{1}{x\ddot{y}} \exp\left\{-\frac{x\ddot{y}^2}{4h_{(2)}}\right\} dx\ddot{y}}{\int_{x_{(s)}}^{\Gamma} \frac{1}{x\ddot{y}} \exp\left\{-\frac{x\ddot{y}^2}{4h_{(2)}}\right\} dx\ddot{y}}. \quad (x_{(s)} < x < \Gamma) \end{aligned} \quad (12)$$

Решая уравнение притока тепла, получим распределения температур:

$$T_{(1)} = T_{(s)}, \quad (0 < x < x_{(s)})$$

$$T_{(2)} = T_{(s)} + (T_0 - T_{(s)}) \frac{\int_{x_{(s)}}^x \frac{1}{x} \exp\left\{-\frac{x^2}{4}\right\} dx}{\int_{x_{(s)}}^{\Gamma} \frac{1}{x} \exp\left\{-\frac{x^2}{4}\right\} dx}. \quad (x_{(s)} < x < \Gamma) \quad (13)$$

Для определения давления $p_{(s)}$ и автомодельной координаты $x_{(s)}$ границы фазовых переходов нетрудно получить следующие уравнения:

$$\frac{h_{(2)}(1-n)}{p_{(s)}^2} \frac{(p_{(s)}^2 - p_0^2) \exp\left\{-\frac{x_{(s)}^2}{4}\right\}}{\int_{x_{(s)}}^{\Gamma} \frac{1}{x} \exp\left\{-\frac{x^2}{4}\right\} dx} - \frac{Q_{(m)} \exp\left\{-\frac{x_{(s)}^2}{4}\right\}}{pm A^{(T)} r_{g(s)}} = n \frac{r_h g}{r_{liq}} + \frac{r_h(1-g)}{r_{liq}} - \frac{1}{B_{(s)}^2}, \quad (14)$$

$$\frac{Q}{2pl} - (T_{(s)} - T_0) \frac{\exp\left\{-\frac{x_{(s)}^2}{4}\right\}}{\int_{x_{(s)}}^{\Gamma} \frac{1}{x} \exp\left\{-\frac{x^2}{4}\right\} dx} = \frac{mn}{2} \frac{r_h l}{rc} x_{(s)}^2.$$

Для радиальносимметричной задачи также установлено, что уменьшение проницаемости среды ведет к повышению давления (и температуры) на границе разложения, и уменьшению координаты границы фазовых переходов. С увеличением гидратонасыщенности, как это и следовало ожидать, происходит увеличение давления на границе фазовых переходов (и, соответственно, увеличение температуры); координата границы разложения газогидрата также при этом уменьшается. Кроме того, уменьшение проницаемости среды ведет к более быстрому падению давления во второй зоне.

Список литературы

1. Нигматулин Р.И., Сыртланов В.Р., Шагапов В.Ш. Автомодельная задача о разложении газогидратов в пористой среде при депрессии и нагреве.// ПМТФ. – 1998. Т.39. № 3. – С. 111 – 118.
2. Истомин В.А., Якушев В.С. Исследование газовых гидратов в России.// Газовая промышленность. – 2001, № 6. – С. 49 – 54.
3. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра. – 1992. – 235 с.
4. Саяхов Ф.Л., Фатыхов М.А., Насыров Н.М. // Доклады международной конференции «Разработка газоконденсатных месторождений». 1990 г., Краснодар. – С. 37 – 41.
5. Шагапов В.Ш., Потапов А.А., Насырова Л.А., Дмитриев В.Л. Тепловой удар под воздействием энергии излучения на пористую среду, частично заполненную газогидратом // Инженерно-физический журнал. – 2003. – Т. 76, № 5. – С. 47 – 53.